http://www.resourcesindustries.net.cn zycy@cugb.edu.cn

国际稀土永磁制成品贸易网络结构特征与依赖关系演化

边 璐[1,2]，孙禹平[1]，张江朋[1,2]

（1. 内蒙古科技大学 经济与管理学院，内蒙古 包头 014000；
2. 黄河“几字弯”高质量发展研究基地，内蒙古 包头 014010）

摘 要：稀土永磁制成品是支撑战略性产业的核心基础元件，其全球贸易格局与依赖关系深刻影响着各国的能源转型进程和科技竞争力。当前，全球稀土永磁制成品产能较为集中，贸易关系呈现非对称特征，同时地缘政治风险进一步加剧了供应链的不确定性。在此背景下，系统揭示国际稀土永磁制成品贸易网络的结构特征和国家间的贸易依赖关系，对于保障中国产业链供应链安全、优化产业布局以及制定精准的贸易政策具有重要意义。基于联合国商品贸易统计数据库，聚焦集成高性能稀土永磁材料的关键终端应用产品，构建2012—2024 年国际稀土永磁制成品贸易网络。首先，运用复杂网络分析方法，从宏观整体拓扑结构和微观节点中心性 2 个维度，刻画网络的演化轨迹与节点地位的变迁。其次，引入鲁汶算法对网络进行凝聚子群划分，揭示贸易集团的动态重组与阵营化趋势。最后，构建贸易依赖指数，从依赖强度、拓扑结构及关键关系对 3 个层面，剖析国家间贸易依赖关系模式。研究发现：1）全球稀土永磁制成品贸易网络的互联性与效率显著提升，网络密度由 0.222 增至 0.311，平均路径长度缩短至 1.882，平均聚类系数相对较高，贸易网络呈现“小世界”特征。2）节点影响力格局发生重构，逐渐呈现多极化趋势。德国依托高端制造业基础始终稳居核心枢纽；中国度中心度先升后降，但仍处前列，不过其中介能力较弱，并非贸易流的关键桥梁；法国、意大利、巴西等后来居上，成为 2024 年新的关键中介节点；泰国等新兴市场的影响力显著上升，而美国的直接连接影响力相对减弱。3）网络中观结构经历了从效率优先到安全优先的转变，由地理邻近驱动的聚类演化为地缘政治导向的阵营化格局，形成了以中国为核心的全球南方子群与美欧主导的发达国家子群共存的格局。4）贸易依赖关系呈现中度依赖增强、高度依赖先增后降、低度依赖收缩的聚合趋势。核心依赖关系也从早期的资源—市场互补型，日益转向核心制造国之间的产业链协同型，并表现出显著的区域化收缩特征。针对上述发现，提出以下建议：实施枢纽强化和通道多元化战略，保障供应链畅通与安全；推动嵌入式协同和标准引领，深度融入并塑造高端产业链；深化南南合作和拓展第三极市场，构建更加平衡的贸易格局；聚焦核心技术突破和品牌化发展，巩固网络核心节点地位；建立健全供应链风险监测与多边协商机制，积极参与全球治理。

关键词：贸易网络；稀土制成品；依赖关系；网络分析

中图分类号：F742；F205 **文献标识码：**A **文章编号：**1673－2464（2026）05－0120－14

收稿日期：2026－01－12；**修订日期：**2026－05－05；**责任编辑：**胡媛。

网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/11.5426.TD.20260727.1844.008 **DOI：**10.13776/j.cnki.resourcesindustries.20260727.004

基金项目：内蒙古自然科学基金面上项目（2025MS07034）。

第一作者简介：边璐，博士、教授，主要从事稀有资源定价与风险管理研究。E-mail：773625529@qq.com

通信作者简介：张江朋，博士、教授，主要从事稀土产业政策研究。E-mail：14442746@qq.com

引用格式：边璐，孙禹平，张江朋，2026. 国际稀土永磁制成品贸易网络结构特征与依赖关系演化[J]. 资源与产业，28(5)：120－133.

BIAN Lu, *SUN Yuping*, *ZHANG Jiangpeng*, 2026. *Structural characteristics and dependency relationship evolution of the international trade network for rare earth permanent magnet manufactured products*[J]. *Resources & Industries*, 28(5): 120－133.

Structural Characteristics and Dependency Relationship Evolution of the International Trade Network for Rare Earth Permanent Magnet Manufactured Products

BIAN Lu[1,2], SUN Yuping[1], ZHANG Jiangpeng[1,2]

(1. *School of Economics and Management, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014000, *China*; 2. *Yellow River Jiziwan High-Quality Development Research Institute, Baotou* 014010, *China*)

Abstract: Rare earth permanent magnet (REPM) manufactured products are core components of strategic industries, and their global trade patterns and dependencies strongly affect energy transitions and technological competitiveness. Global REPM production is concentrated; trade relations are asymmetric; and geopolitical risks increase supply chain uncertainty. Revealing the structure and dependency evolution of international REPM trade network is therefore important for China's supply chain security, industrial layout, and trade policy. Using UN Comtrade data and focusing on key end-use products incorporating high-performance REPM materials, this study builds an international REPM manufactured products trade network from 2012 to 2024. It first applies complex network analysis to characterize the network's evolution and shifts in node status through macro-level topology and micro-level centrality. It then uses the Louvain algorithm to identify cohesive subgroups, revealing trade bloc restructuring and bloc formation. Finally, it constructs a trade dependence index to analyze inter-country dependence patterns in terms of intensity, topology, and key relationship pairs. The results show that network connectivity and efficiency improved notably, with density rising from 0.222 to 0.311, average path length falling to 1.882, and relatively high clustering, indicating "small-world" features. Node influence has become more multipolar. Germany remains a core hub; China's degree centrality first rose then declined but remains high, though its intermediary capacity is weak; France, Italy and Brazil become new key intermediaries in 2024; Thailand's influence rises, while U.S. direct connectivity weakens. The meso-level structure shifts from efficiency-first to security-first, evolving from geographic clustering to geopolitically oriented blocs, with a China-centered global south subgroup coexisting with a U.S.-Europe-led developed-country subgroup. Dependence shows stronger moderate ties, high dependence rising then falling, and shrinking low dependence. Core ties shift from resource-market complementarity to industrial-chain synergy among major manufacturers, with marked regionalization. It is recommended that a strategy of hub strengthening and corridor diversification be implemented to ensure smooth and secure supply chains, that embedded collaboration and standard leadership be promoted to deeply integrate into and shape high-end industrial chains, that South-South cooperation be deepened and third-pole markets be expanded to build a more balanced trade pattern, that breakthroughs in core technologies and brand development be pursued to consolidate the position of core network nodes, and that supply chain risk monitoring and multilateral consultation mechanisms be established and improved to actively participate in global governance.

Key words: trade network; rare earth manufactured products; dependency relationships; network analysis

0　引言

稀土永磁制成品作为稀土材料的关键终端产品，是支撑绿色能源、高端装备与精密医疗等产业发展的核心基础元件（鲁景亮，2017）。其贸易格局与依赖关系直接影响各国在能源转型和科技竞争中的战略地位（赵芝等，2019）。当前，全球稀土永磁制成品生产能力在地理空间上高度集中，贸易关系呈非对称依赖特征（陈乔等，2022）。德国、美国、日本等传统制造强国凭借深厚的制造业基础，在高端高性能稀土永磁制成品领域构筑了巨大的技术壁垒和市场优势，而中国依托完整的稀土产业链及规模制造优势，已成为全球最大的稀土永磁材料及中端制成品生产与供应国。随着全球高端制造升级，风电、新能源汽车、节能家电及高端医疗设备等领域需求持续攀升，稀土永磁制成品贸易规模迅速扩大，贸易网络也日趋复杂（汤林彬等，2024）。然而，近年来地缘政治风险加剧、贸易保护主义抬头、关键矿产供应链风险上升，增加了国

际稀土永磁制成品贸易的不确定性（边璐等，2023）。2019 年，习近平总书记在江西考察时强调“要加大科技创新工作力度，不断提高开发利用的技术水平，延伸产业链，提高附加值”，这为中国稀土强国建设提供了根本遵循。在此背景下，系统剖析国际稀土永磁制成品贸易网络的结构特征与依赖关系演化，对于科学研判相关产业发展趋势、防范供应链风险、制定贸易与产业政策具有重要的理论与现实意义。

有关稀土及其制成品国际贸易网络的研究已形成较为成熟的分析范式，为本研究奠定了基础。现有成果集中在以下 3 个方面：1）稀土贸易格局与供应链安全研究。大量文献聚焦于上游稀土矿石或初级化合物的贸易流动与供应链风险，普遍认为中国长期主导供应端，而美、日、欧等存在严重的进口依赖，形成了脆弱且不对称的贸易结构（杨鑫等，2026；杨丹辉等，2024；高凤平等，2019）。近年来，随着中国产业政策调整与国际供应链多元化发展，贸易格局有所重构，但中国在中游永磁材料环节的优势依然显著（李航飞等，2024）。部分研究开始涉及永磁体或永磁电机等个别终端产品的贸易分析，但往往未将风电机组、核磁共振设备等集成稀土永磁体的最终制成品作为一个整体范畴进行系统考察（周美静等，2023）。2）稀土产业国际竞争力评估。此类研究多采用显示性比较优势指数、贸易竞争力指数、出口技术复杂度等指标（许明等，2019；祝孔超等，2022；戚兆坤等，2020），对国家层面的稀土相关产品竞争力进行测度。研究结果显示，中国在稀土原材料及中低端永磁体上具有较强的价格与规模竞争力，但在应用于精密仪器、尖端军工等领域的高稳定性、低损耗高端稀土永磁制成品的整机制造与品牌方面，与发达国家相比仍存在明显差距（陆颖等，2019；叶前林等，2025a）。竞争力研究多集中于产品层面或国家静态对比，缺乏从动态网络视角审视竞争力如何影响并体现在全球贸易关系结构与位置权力之中。3）稀土贸易的影响因素与政策分析。部分研究识别了资源禀赋、产业政策、技术创新、环境规制、国际贸易规则乃至地缘政治等多重因素对稀土贸易流的影响（边璐等，2020；廖秋敏等，2023；夏启繁等，2022；张群卉，2016）。其中，国内产业补贴、出口管制、国外供应链重组战略等政策因素得到了广泛讨论。然而，这些研究多依赖于传统计量经济模型分析双边贸易流量，难以揭示多边、全局性的网络结构特征及依赖关系的复杂传导路径。

近年来，复杂网络理论在国际贸易研究领域得到广泛应用。部分研究相继构建了全球货物贸易（郑挺国等，2025；国家发展改革委宏观经济研究院对外经济研究所课题组，2023；蒋小荣等，2021；赵昌平等，2017）、特定产品类别（王军等，2026；刘亦文等，2024；王雁莉等，2024）乃至全球价值链（王雪婷等，2025）的网络模型，从整体拓扑结构、节点中心性、社团聚类、鲁棒性等维度，深刻揭示了贸易系统的“小世界”“无标度”特性、核心－边缘结构及其演化规律（尤荻等，2024；马述忠等，2016）。上述研究将关注点从传统的双边贸易量分析转向多边关系的结构与位置权力分析，为理解国家在全球经济系统中的角色与相互依赖关系提供了新的分析范式。聚焦到战略性关键矿产及其高附加值制成品领域，现有文献围绕锂（张奇等，2025；李帅威等，2025）、钴（赵怡然等，2022；孙源辰等，2025；郭尧琦等，2025）等展开讨论，但对稀土永磁制成品的贸易网络研究尚显薄弱。既有零星研究将其笼统归于稀土产品（叶前林等，2025b），未能精准区分原材料与高技术集成制成品贸易模式的差异，难以反映产业全貌。因此，系统地对国际稀土永磁制成品贸易网络的结构特征、节点角色、依赖关系及其演化进行纵深剖析的研究仍需进一步丰富。本文基于联合国商品贸易统计数据库（UN Comtrade），构建 2012—2024 年国际稀土永磁制成品贸易网络，运用复杂网络分析方法和贸易依赖指数，分析稀土永磁制成品贸易网络的整体结构特征、演化轨迹及节点国家地位变迁，识别贸易依赖关系的动态模式，揭示关键依赖路径与不对称性格局，以期对稀土产业相关现实问题提供较为准确的认知。

1 方法与数据

1.1 模型方法

参考蒋子龙等（2025）的做法，将国际稀土永磁制成品贸易抽象为动态演化的有向加权网络（G）。其中，参与稀土永磁制成品贸易的国家/地区为节点集合 V，国家间贸易关系构成边的集合 E，

贸易额则作为对应边的权重 W。因此，对于任意给定年份 t，贸易网络可表示为 $G_t = (V_t, E_t, W_t)$，其中节点数量、连接关系均随时间变化。网络的拓扑结构及贸易量由邻接矩阵 $\boldsymbol{A}_t = [a_{ij}]_t$ 刻画，矩阵元素 a_{ij} 为 t 年份从国家 i 出口至国家 j 的稀土永磁制成品贸易额，若无此贸易流，则取值为 0。最终，构建了 2012—2024 年共 13 个连续时间截面贸易网络，作为后续动态分析的基础。

为系统揭示稀土永磁制成品贸易网络的结构特征，在宏观层面选取关系数量、网络密度、平均聚类系数、平均路径长度等指标，刻画贸易网络的规模、联系紧密程度、局部聚集特性以及信息或贸易流传递的整体效率，从而反映网络的整体拓扑结构及演化趋势。在微观层面，聚焦于国家在网络中的地位与权力，选取度中心性、中介中心性、接近中心度以及 *PR* 值等指标进行考察。上述指标分别从连接广泛性、贸易控制与桥梁作用、不受他人控制的能力以及基于连接质量的综合影响力等角度考察节点中心性及其演化，进而识别出网络中的核心枢纽、关键中介与边缘参与者。相关公式与说明见表 1。

表 1　指标计算公式与说明

Table 1　Indicator calculation formulas and explanations

指标	公式	说明
关系数量	$E = \lvert\{(i,j): a_{ij} > 0, i,j \in V, i \neq j\}\rvert$	E 为关系数量；a_{ij} 为国家 i 到 j 的出口额
网络密度	$DE = \dfrac{E}{N(N-1)}$	DE 为网络密度；E 为实际关系数量；N 为节点数量
平均路径长度	$AL = \dfrac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}$	AL 为平均路径长度；d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的最短路径距离
平均聚类系数	$AC = \dfrac{1}{N} \sum_i \left\{ \dfrac{1}{D_i(D_i-1)} \sum_{j,k} (a_{ij} a_{ik} a_{jk}) \right\}$	AC 为平均聚类系数；D_i 为节点 i 的度；a_{ij} 为邻接矩阵元素
度中心度	$D = \dfrac{D_i}{N-1}$	D 为度中心度；D_i 为节点 i 的度值；$N-1$ 为最大可能度值
接近中心度	$C = \dfrac{1}{\sum_{i \neq j} D_{ij}}$	C 为节点 i 的接近中心度；D_{ij} 为节点 i 到节点 j 的最短路径距离
中介中心度	$B = \sum_{i \neq k \neq j} \dfrac{G_{jk}(i)}{G_{jk}}$	B 为节点 i 的中介中心度；G_{jk} 为节点 j 到节点 k 的最短路径总数；$G_{jk}(i)$ 为经过节点 i 的最短路径数量
PR 值	$PR(i) = \dfrac{(1-d)}{N} + d \sum_{j \in M(i)} \dfrac{PR(j)}{L(j)}$	$PR(i)$ 为节点 i 的 PageRank 值；$M(i)$ 为指向节点 i 的节点集合；$L(j)$ 为节点 j 的出度；d 为阻尼因子，通常取 0.850

同时，为揭示贸易网络的中观结构，运用鲁汶算法进行凝聚子群划分，以识别具有紧密内部贸易联系的贸易集团，探究国际稀土永磁制成品贸易是否呈现区域化或联盟化态势。计算过程如下：第 1 步，初始化社区，将每个节点都作为一个社区；第 2 步，遍历每个节点，尝试将其移动到邻居节点的社区，计算模块度增益 ΔQ，若 $\max(\Delta Q) > 0$，则将其移入使 ΔQ 最大的社区；第 3 步，将上一步得到的社区视为新节点，社区内部边权重转化为新节点的自环，社区间边权重转化为新节点间的边权重；第 4 步，重复第 2 步和第 3 步，直到模块度 Q 不再增加。

进一步，通过贸易依赖指数刻画国际稀土永磁制成品贸易依赖关系（丁浚峰等，2025）。计算公式为

$$GL_{ij} = 1 - \frac{|RE_{ij} - RI_{ij}|}{RE_{ij} + RI_{ij}}, \tag{1}$$

式中：GL_{ij} 为 i 国与 j 国间的稀土永磁制成品贸易依赖指数；RE_{ij} 为 i 国对 j 国稀土永磁制成品出口额；RI_{ij} 为 i 国对 j 国稀土永磁制成品进口额。GL_{ij} 越大，i 国与 j 国间贸易依赖性越强。$GL_{ij} \geqslant 0.5$ 时，为高度依赖；$0.5 > GL_{ij} > 0.2$ 时，为中度依赖；$0.2 \geqslant GL_{ij}$ 时，为低度依赖。

1.2　数据来源

为确保研究数据的可比性、连续性与完整性，以 2012—2024 年 UN Comtrade 数据库中稀土永磁制成品的双边贸易数据为基础。研究范围明确聚焦于集成高性能稀土永磁材料的关键终端应用产品，包

括风力发电机组（HS 850231）、特定功率范围的直流电动机（HS 850132）、核磁共振成像装置（HS 901813）以及变频空调（HS 841510）。上述终端应用产品代表了稀土永磁材料在清洁能源、高端工业驱动、精密医疗及高效节能家电等战略性领域的应用，其贸易流向能够反映全球稀土下游高附加值产业的格局与联系。针对各国在贸易统计口径、转口贸易及分类细微差异上可能存在的“双边不对称”现象，为最大程度保证数据的一致性和可靠性，以出口贸易额作为构建与计算国际贸易网络的基准数据。在具体处理过程中，依据 HS 编码提取所有报告国的出口数据，进而构建以国家为节点、以贸易关系为边的有向加权网络。对于少数缺失数据，在保证整体网络连续性、代表性的前提下予以剔除。

2 网络结构特征

2.1 整体结构特征

图 1 为 2012 年和 2024 年贸易额强度为 100 亿美元及以上的贸易关系图。可以看出，≥100 亿美元的贸易关系数量显著增多，平均贸易强度快速提高。具体而言，2012 年存在多个高贸易强度的双边贸易关系，但主要经济体之间的贸易联系较为分散；到了 2024 年，贸易网络集中趋势明显，尤其是中国的贸易关系明显扩展，成为许多国家贸易的中心枢纽。印度、东南亚地区的部分国家开始崭露头角，说明国际贸易中心逐步转移，新兴市场经济体迅速崛起。此外，强贸易关系大部分集中在少数几个经济体之间，形成了较为紧密的贸易圈。

图 2 展示了整体网络指标变化情况。从贸易网络规模与连通强度来看，2012—2024 年，国际稀土永磁制成品贸易网络表现出明显的扩张态势。其中，网络关系数量由 2012 年的 8 137 条增长至 2024 年的 11 397 条，网络密度由 0.222 上升至 0.311。这表明在全球能源转型与工业自动化进程中，稀土永磁制成品作为核心部件的贸易往来日益频繁，国家间的贸易联系显著增强。尽管 2020 年受全球公共卫生事件及供应链中断影响，关系数量与网络密度出现短暂回落，但自 2021 年起迅速反弹并超过疫情前水平。

从集聚程度和网络传输效率来看，平均聚类系数持续保持在较高水平，在 0.750 ~ 0.821 之间波动，且均值远高于随机网络，表明稀土永磁制成品贸易网络存在显著的贸易集团化特征，成员国倾向于在特定区域或贸易联盟内形成紧密的贸易集群。与此同时，平均路径长度呈现波动下降趋势，从 2.109 缩短至 1.882，即贸易节点间的转单环节逐步减少，贸易效率持续优化。较高的聚类系数与较低的平均路径长度说明，国际稀土永磁制成品贸易网络具有典型的“小世界”特征，国家间的贸易依赖关系愈发直接、紧密。

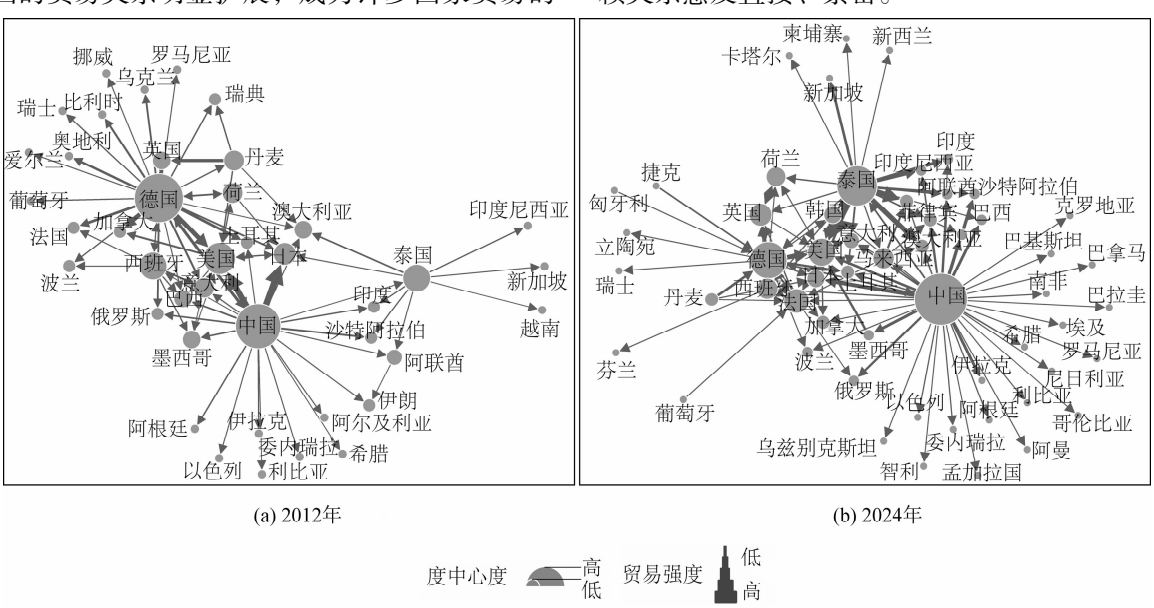


图 1 稀土永磁制成品贸易网络

Fig. 1 Trade network of rare earth permanent magnet manufactured products

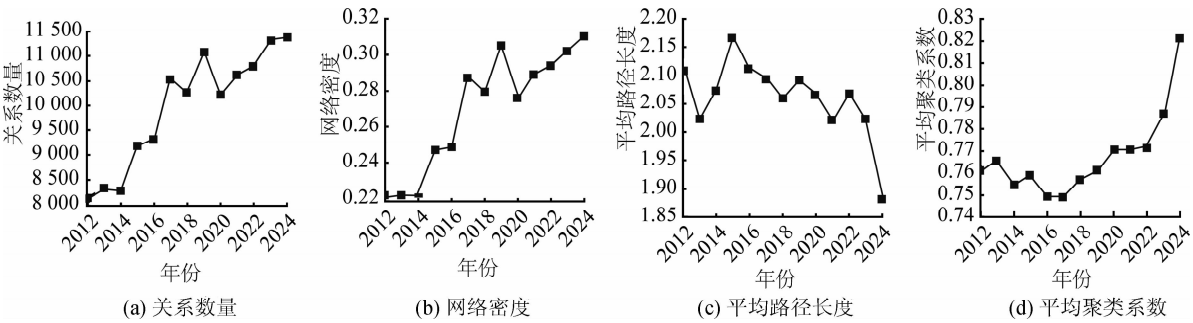


图 2　整体网络指标统计

Fig. 2　Statistics of overall network indicators

2.2　个体中心性

表 2 为 2012 年、2016 年、2020 年及 2024 年度中心度统计结果。其中，德国在 4 个时间截面上持续位列前三，体现了德国作为欧洲制造业枢纽及稀土永磁终端产品贸易中心的稳固地位。中国度中心度呈现先升后降的态势，从 2012 年的 3.152 快速提升至 2016 年的 5.223，2020 年回落至 3.677，2024 年升至 3.864，但排名从第 2 位滑落至第 6 位，这反映了稀土永磁产业链的阶段性调整与中国贸易结构的阶段性转型，部分中低端制造环节向其他地区转移。美国度中心度相对稳定，维持在 3.0 左右，但排名从 2012 年的第 3 位逐渐降至 2024 年的第 8 位，即美国直接贸易连接的相对影响力有所减弱。另外，泰国度中心度呈快速上升态势，从 2012 年的第 18 位上升至 2020 年的第 2 位，成为东南亚

表 2　排名前 20 的度中心度

Table 2　Top 20 degree centrality

节点	2012 年	节点	2016 年	节点	2020 年	节点	2024 年
德国	6.576	德国	6.187	德国	6.870	法国	7.660
中国	3.152	中国	5.223	泰国	4.932	德国	7.330
美国	2.890	美国	3.041	中国	3.677	泰国	4.445
意大利	2.293	西班牙	2.378	美国	3.214	英国	4.099
法国	2.204	土耳其	2.321	土耳其	2.891	西班牙	3.906
荷兰	2.194	法国	2.280	英国	2.870	中国	3.864
西班牙	2.120	荷兰	2.264	西班牙	2.839	土耳其	3.482
英国	1.953	意大利	2.259	荷兰	2.734	美国	3.283
南非	1.832	泰国	2.119	法国	2.635	荷兰	3.152
瑞士	1.576	英国	2.067	意大利	2.396	意大利	2.974
土耳其	1.524	瑞士	1.762	瑞士	1.927	罗马尼亚	2.529
日本	1.398	南非	1.679	比利时	1.896	比利时	2.277
比利时	1.393	比利时	1.668	韩国	1.651	波兰	2.162
阿联酋	1.330	韩国	1.539	印度	1.651	瑞士	2.131
韩国	1.309	丹麦	1.503	丹麦	1.609	希腊	2.047
印度	1.298	日本	1.456	阿联酋	1.583	印度	2.005
丹麦	1.293	新加坡	1.409	新加坡	1.516	瑞典	1.927
泰国	1.293	中国香港	1.373	日本	1.510	捷克	1.901
奥地利	1.230	印度	1.332	捷克	1.490	葡萄牙	1.853
新加坡	1.225	阿联酋	1.311	希腊	1.479	丹麦	1.791

地区重要的贸易节点。法国则从 2012 年的第 5 位波动下降后上升，并于 2024 年以 7.660 的度中心度位居全球第一，究其原因，得益于法国在欧洲电动汽车及航空等高技术领域供应链中核心位置的增强。此外，英国、西班牙、土耳其等国的度中心度也呈现整体波动增长趋势，表明稀土永磁制成品的贸易网络呈现多极化发展，传统欧美核心节点与新兴市场节点共同构成了日益密切的直接贸易网络。

接近中心度衡量了节点在网络中的贸易效率和不受其他节点控制的能力，数值越低表明该节点与其他节点的平均距离越短，在贸易中越具效率与独立性。从表 3 来看，2012 年，德国（0.281）、加拿大（0.209）与比利时（0.188）位居前三，在国际贸易路径中具有较高的效率和贸易独立性，是贸易网络的重要枢纽节点。在随后的年份中，核心节点的接近中心度发生了较大变动。2016 年，西班牙（0.245）成为新的效率核心，南非（0.179）与斯洛文尼亚（0.147）跻身前列，而德国降至第 4 位（0.139），说明网络效率枢纽开始从传统西欧核心向欧洲南部及新兴市场扩散。2020 年，德国（0.287）、英国（0.262）领先，同时卢森堡（0.189）、马耳他（0.142）等小型开放经济体凭借高效的转口与分销网络跻身前列。到了 2024 年，网络结构出现重大变化，罗马尼亚与比利时均为 0.106，并列第一，芬兰（0.087）、德国（0.083）、泰国（0.079）紧随其后。中国的接近中心度从 2012 年的 0.130（第 6 位）波动下降至 2024 年的 0.040（第 14 位），尽管直接贸易连接依然广泛，但在整体网络中的路径效率优势相对减弱。相比之下，美国未出现在 2024 年前 20 榜单中，进一步印证了美国在贸易网络中的直接影响力和路径控制力均有所下降。

表 3 排名前 20 的接近中心度

Table 3 Top 20 closeness centrality

节点	2012 年	节点	2016 年	节点	2020 年	节点	2024 年
德国	0.281	西班牙	0.245	德国	0.287	罗马尼亚	0.106
加拿大	0.209	南非	0.179	英国	0.262	比利时	0.106
比利时	0.188	斯洛文尼亚	0.147	卢森堡	0.189	芬兰	0.087
新加坡	0.148	德国	0.139	马耳他	0.142	德国	0.083
西班牙	0.141	比利时	0.135	西班牙	0.108	泰国	0.079
中国	0.130	英国	0.118	爱沙尼亚	0.104	塞尔维亚	0.076
南非	0.124	瑞士	0.115	埃及	0.094	爱尔兰	0.075
英国	0.102	墨西哥	0.106	罗马尼亚	0.091	法国	0.072
希腊	0.100	土耳其	0.104	希腊	0.083	摩尔多瓦	0.068
瑞士	0.098	波兰	0.095	泰国	0.076	英国	0.054
泰国	0.089	法国	0.084	比利时	0.072	希腊	0.047
马耳他	0.082	波黑	0.083	乌克兰	0.071	波兰	0.043
土耳其	0.077	中国	0.083	阿联酋	0.070	斯洛文尼亚	0.042
印度	0.075	克罗地亚	0.078	安哥拉	0.069	中国	0.040
塞尔维亚	0.073	丹麦	0.078	塞尔维亚	0.065	爱沙尼亚	0.033
法国	0.073	阿曼	0.071	南非	0.064	瑞士	0.032
匈牙利	0.072	意大利	0.063	奥地利	0.062	葡萄牙	0.029
芬兰	0.071	荷兰	0.062	阿塞拜疆	0.061	荷兰	0.028
奥地利	0.069	坦桑尼亚	0.054	印度	0.059	乌兹别克斯坦	0.027
智利	0.056	韩国	0.048	中国	0.057	意大利	0.025

中介中心度刻画了节点作为贸易“桥梁”或“中介”的控制能力，高值节点对贸易流具有调配和控制作用。表 4 显示，2012 年，比利时、日本、法国、智利、南非等国中介中心度数值高且相对接近，表明贸易网络中存在多个重要中介，国际贸易流分散经由这些枢纽进行连接。2016 年，前 20 位

表 4　排名前 20 的中介中心度

Table 4　Top 20 intermediary centrality

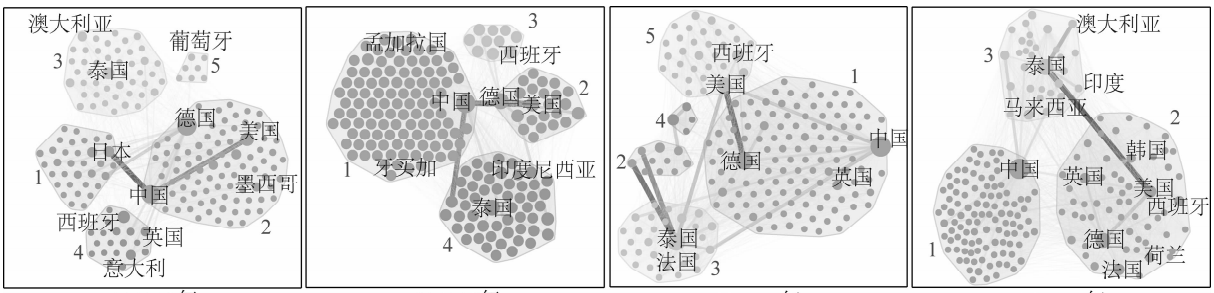
节点	2012 年	节点	2016 年	节点	2020 年	节点	2024 年
比利时	653.234	西班牙	242.906	英国	2 359.381	法国	967.793
日本	653.233	瑞士	242.667	泰国	2 355.743	意大利	967.348
法国	653.210	泰国	242.656	罗马尼亚	2 351.615	巴西	966.850
智利	653.025	哥伦比亚	242.525	德国	2 351.298	墨西哥	966.525
南非	652.985	印度尼西亚	242.497	奥地利	2 348.544	罗马尼亚	965.778
萨尔瓦多	652.961	比利时	242.462	法国	2 348.286	波兰	965.669
斯里兰卡	652.786	意大利	242.423	老挝	2 346.888	匈牙利	965.220
希腊	652.327	日本	242.382	比利时	2 346.377	瑞士	963.933
德国	652.120	丹麦	242.342	利比亚	2 346.251	英国	963.818
马来西亚	652.117	北马其顿	242.335	尼泊尔	2 346.251	乌拉圭	963.183
新加坡	652.014	法国	242.319	巴林	2 345.948	葡萄牙	963.009
阿根廷	651.958	亚美尼亚	242.289	安道尔	2 345.687	西班牙	962.649
毛里塔尼亚	651.799	新西兰	242.172	西班牙	2 339.609	比利时	962.383
安道尔	651.242	文莱	242.090	卢森堡	2 333.973	伊拉克	962.373
英国	651.225	孟加拉国	242.074	阿联酋	2 326.685	利比亚	962.363
韩国	651.194	保加利亚	242.015	波黑	2 325.971	保加利亚	962.229
匈牙利	650.767	几内亚	241.969	马耳他	2 318.235	埃及	962.089
巴拉圭	650.649	斯洛文尼亚	241.941	埃塞俄比亚	2 310.033	格鲁吉亚	960.921
中国	649.281	匈牙利	241.850	中国	2 306.851	奥地利	960.708
印度	649.245	蒙古	241.824	瑞士	2 294.419	德国	960.196

节点的中介中心度整体下降至 240 左右，西班牙、瑞士、泰国成为新的中介核心，这可能与同期全球供应链区域化重组及东南亚制造业地位上升有关。2020 年，中介中心度出现异常跃升，英国、泰国、罗马尼亚、德国等国的中介中心度快速升至2 300 以上，原因是新冠疫情冲击导致全球供应链短暂紊乱，特定节点的中介作用被迅速放大。到了 2024 年，前 20 名的中介中心度回落至 960 左右，排名再次洗牌，法国（967.793）、意大利（967.348）、巴西（966.850）、墨西哥（966.525）成为新的前四强。中国的中介中心度排名较低，表明尽管中国是重要的生产与贸易国，但在国际稀土永磁制成品贸易的网络路径中并非主要的“桥梁”国家，贸易流更多是直接或通过其他枢纽进行连接。

2.3　贸易子群划分

图 3 为2012 年、2016 年、2020 年和2024 年国际稀土永磁制成品贸易子群划分结果。整体上模块度 Q 值均大于 0.800，划分效果较好。

2012 年，国际稀土永磁贸易子群划分很大程度上遵循了当时全球价值链分工的经济逻辑。第 1 个子群是以日本为核心的“泛技术－市场子群”，成员包括加拿大、俄罗斯、荷兰、瑞典、以色列以及多个东欧和东南亚经济体，反映了日本作为当时重要技术输出和贸易枢纽的地位，其网络辐射范围广但结构相对松散。第 2 个子群是“中美德与全球南方国家子群”，核心为中国、美国和德国，并囊括了巴西、墨西哥、乌克兰、巴基斯坦以及众多非洲与拉美国家。中国作为全球最大的稀土开采与初级加工中心，与美国、德国等核心消费市场和技术研发中心处于同一贸易子群内部，贸易流动的阻力较小，全球分工红利处于释放期，同时也拉动了广泛的南南贸易联系。第 3 个子群是“亚太－中东子群”，以沙特阿拉伯、泰国、澳大利亚、印度、阿联酋、新加坡、韩国等为代表，成员集中于环印度洋和西太平洋地区。第 4 个子群是“西欧核心子群”，由英国、法国、意大利、比利时等西欧及中欧国家组成，是典型的区域性一体化供应链子群。



(a)2012年 (b)2016年 (c)2020年 (d)2024年

图 3 凝聚子群划分结果

Fig. 3 Cohesive subgroup partitioning results

第 5 个子群是规模较小的“南欧 – 葡语国家子群”，以葡萄牙、克罗地亚及部分非洲葡语国家为主，主要依赖历史贸易或特殊双边联系。整体上 2012 年贸易子群划分与地缘经济板块有较高的重合度，力量相对分散均衡，子群结构尚未表现出明显的竞争对垒，更多是基于效率最大化原则的贸易聚类。

2016 年，贸易子群结构发生剧变，原有的多中心格局被打破。以中国为核心的子群 1 在规模上实现了爆发式增长，不仅吸纳了东亚、东南亚的广大新兴市场，还将中东、非洲、拉美以及部分东欧国家纳入其中。这一结构转变标志着，随着“一带一路”倡议的深入推进，中国稀土永磁制成品的辐射范围已从传统的成熟工业国扩散至广阔的“全球南方”市场，形成了以中国为技术中心、新兴国家为增长极的庞大贸易子群。与此相对应，子群 2 演变为以美国、德国、英国、加拿大、瑞士为核心的西方发达国家贸易子群。西方核心工业国开始在战略物资领域强化内部协同，试图通过社团内部的横向贸易增强供应链的稳定性，从而在贸易子群层面与中国主导的广域子群形成一定的区隔。此时的子群演化已不再单纯受地理邻近性驱动，而是表现出明显的产业功能化聚集。

2020 年，受突发公共卫生事件冲击，全球供应链波动，贸易子群数量增加至 5 个。中国领导的子群 1 经济体在数量上依然维持主导地位，但是成员结构逐步向资源保障与基建合作方向进一步倾斜，哈萨克斯坦、刚果（金）、坦桑尼亚等资源富集国在子群内的黏性显著增强。由美国、墨西哥、挪威、瑞典、南非、韩国等国组成的子群 5 快速兴起，在供应链安全担忧加剧的背景下，美国开始联合具备矿产潜力与加工能力的盟友，试图构建一个独立于原有核心之外的平行供应链体系。2024 年，子群 1 演变为中国与“全球南方”国家及独联体国家的深度利益共同体，俄罗斯、白俄罗斯、以及广大非洲和拉美国家在子群内与中国形成了极强的贸易依赖。中国依托成熟的加工产能和全产业链优势，将这些国家纳入其主导的稀土供应链中。子群 2 涵盖了美国、英国、德国、法国、意大利、韩国等主要发达经济体，说明西方主要经济体在稀土永磁领域已逐步实现深度的“友岸外包”与内部循环。而由印度、新加坡、澳大利亚、阿联酋、马来西亚、越南等国构成的子群 3，则成为了国际稀土永磁制成品贸易网络中的重要参与者。

纵观贸易子群演变趋势，可以发现：国际稀土永磁贸易子群的重塑逻辑是从效率优先转向安全优先，从地理邻近转向政治亲近。中国在网络中的关键地位虽未动摇，但贸易重点已从西方工业体系向广大发展中国家转移，这既是市场扩张的必然结果，也是应对外部贸易壁垒的战略选择。

3 依赖关系演化

3.1 依赖关系拓扑结构

图 4 为国际稀土永磁制成品贸易依赖关系拓扑结构。从 2012—2024 年的演化来看，贸易依赖关系呈“中度依赖增强、高度依赖先增后调、低度依赖收缩”的特征。其中，高度依赖关系数量由 2012 年的 178 条升至 2020 年的 211 条，说明主要生产和消费国家之间贸易纽带日益紧密，产业链关键环节的集中度提高。2024 年小幅回落至 192 条，部分国家通过多元化策略降低对单一贸易伙伴的过度依赖。中度依赖关系亦呈上升趋势，从 2012 年的 156 条增至 185 条，说明更多国家之间建立了较为均衡的贸易往来。低度依赖关系在 2020 年前增长缓慢，

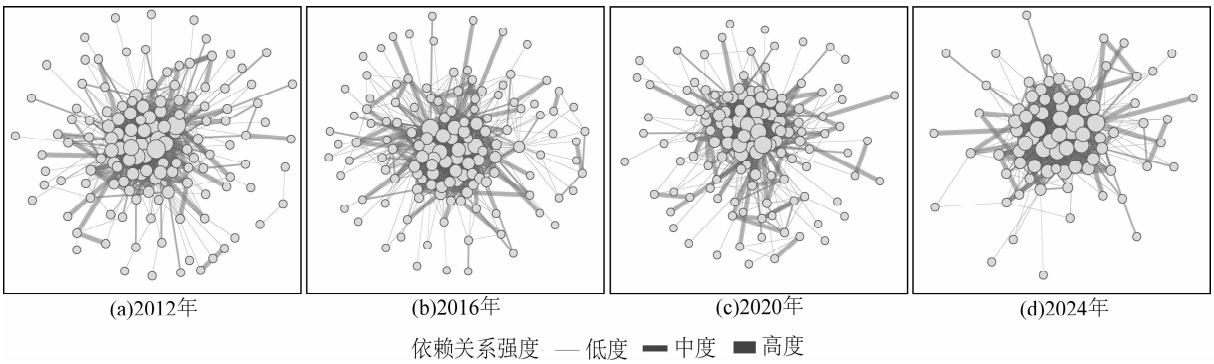


图 4　贸易依赖关系拓扑结构

Fig. 4　Topological structure of trade dependence relationships

2024 年骤降至 419 条，边缘依赖减少，贸易关系向中高强度聚合，整体网络拓扑结构更加紧密且层级分明。

3.2　主要依赖关系剖析

对贸易依赖指数对关系强度进行排序，可得到 2012 年、2016 年、2020 年和 2024 年排名前 20 的依赖关系对（表 5）。从依赖关系的空间构成来看，2012 年，高度依赖关系对分布较为分散，既包含多米尼加 – 意大利、新加坡 – 西班牙等跨区域联系，也包含印度 – 澳大利亚、中国 – 澳大利亚等资源供需型联系，说明早期依赖关系具有多元性。2016 年

表 5　排名前 20 的贸易依赖关系

Table 5　Top 20 trade dependence relationships

2012 年		2016 年		2020 年		2024 年	
依赖关系	依赖指数	依赖关系	依赖指数	依赖关系	依赖指数	依赖关系	依赖指数
多米尼加 – 意大利	1.000	巴西 – 智利	0.998	瑞典 – 马来西亚	0.998	保加利亚 – 塞尔维亚	0.999
新加坡 – 西班牙	0.998	中国 – 德国	0.991	斯洛伐克 – 西班牙	0.997	法国 – 波黑	0.993
印度 – 澳大利亚	0.995	希腊 – 斯洛文尼亚	0.991	塞尔维亚 – 阿尔巴尼亚	0.995	捷克 – 法国	0.993
斯威士兰 – 莫桑比克	0.995	新西兰 – 美国	0.988	乌克兰 – 瑞士	0.994	卢森堡 – 捷克	0.988
中国 – 澳大利亚	0.994	日本 – 波兰	0.988	希腊 – 斯洛文尼亚	0.992	日本 – 荷兰	0.979
比利时 – 瑞典	0.992	墨西哥 – 日本	0.988	德国 – 英国	0.991	希腊 – 波兰	0.979
波黑 – 意大利	0.992	土耳其 – 斯洛文尼亚	0.986	波黑 – 瑞士	0.991	匈牙利 – 塞尔维亚	0.976
芬兰 – 波兰	0.992	加蓬 – 美国	0.986	匈牙利 – 捷克	0.990	希腊 – 斯洛文尼亚	0.966
萨尔瓦多 – 危地马拉	0.990	克罗地亚 – 波兰	0.984	乌克兰 – 荷兰	0.988	丹麦 – 立陶宛	0.957
韩国 – 荷兰	0.987	瑞士 – 美国	0.983	布基纳法索 – 科特迪瓦	0.979	厄瓜多尔 – 秘鲁	0.956
葡萄牙 – 丹麦	0.977	土耳其 – 比利时	0.981	匈牙利 – 塞尔维亚	0.977	法国 – 爱尔兰	0.955
波兰 – 法国	0.977	意大利 – 爱尔兰	0.978	爱尔兰 – 荷兰	0.976	德国 – 斯洛伐克	0.953
马来西亚 – 泰国	0.969	德国 – 爱沙尼亚	0.977	保加利亚 – 意大利	0.974	中国 – 荷兰	0.953
保加利亚 – 乌克兰	0.967	克罗地亚 – 捷克	0.973	新加坡 – 比利时	0.967	日本 – 菲律宾	0.953
西班牙 – 印度	0.965	毛里求斯 – 法国	0.971	匈牙利 – 立陶宛	0.963	荷兰 – 葡萄牙	0.951
立陶宛 – 奥地利	0.958	日本 – 法国	0.968	比利时 – 法国	0.962	保加利亚 – 瑞士	0.950
瑞士 – 中国	0.954	危地马拉 – 西班牙	0.964	加拿大 – 日本	0.962	克罗地亚 – 西班牙	0.950
荷兰 – 美国	0.954	英国 – 韩国	0.962	南非 – 土耳其	0.960	意大利 – 英国	0.949
新加坡 – 澳大利亚	0.951	塞尔维亚 – 西班牙	0.961	挪威 – 法国	0.957	克罗地亚 – 罗马尼亚	0.946
塞尔维亚 – 斯洛文尼亚	0.949	新西兰 – 韩国	0.959	捷克 – 瑞士	0.956	波兰 – 荷兰	0.944

和 2020 年，主要依赖关系明显向重点国家集中，中国－德国、日本－波兰、德国－英国等涉及核心制造国与消费市场的依赖指数居高不下，表明产业链中枢纽节点之间形成了深度捆绑。到了 2024 年，主要依赖关系的空间格局发生显著调整，保加利亚－塞尔维亚、法国－波黑、捷克－法国、卢森堡－捷克等欧洲内部国家对的排名大幅上升并占据头部，同时中国－荷兰成为少数跻身前列的跨区域依赖关系。反映了在地缘政治与供应链安全背景下，贸易依赖关系呈现出明显的“区域化收缩”与“近岸重组”趋势，欧洲内部循环加强。

从关键国家的角色演化来看，中国的依赖关系结构发生了战略性转变。2012 年，中国主要与澳大利亚、瑞士等形成高依赖关系。2016 年与德国等高端制造国的依赖关系进一步强化并位居前列，说明中国深度融入全球价值链。2024 年，尽管中国仍是依赖网络中心节点，但最高等级的依赖关系对象转变为荷兰，依赖指数为 0.953，说明中国高附加值永磁制品出口更多地通过荷兰这样的欧洲枢纽港口和分销中心进入欧盟市场。从依赖关系性质的变化来看，主要依赖关系逐步从“互补型”向“协同型”与“区域一体化型”深化。早期的关系对常表现为资源国与制造国、制造国与消费市场之间的互补依赖。而近年来，像日本－荷兰、德国－斯洛伐克、捷克－法国等排名靠前的关系对，更多是发生在制造业体系内部、产业链环节紧密协同的发达国家之间，或像保加利亚－塞尔维亚这样处于同一区域一体化进程中的国家之间。依赖关系性质变化表明，稀土永磁贸易的依赖基础，已从单纯的资源禀赋或市场容量差异，转向了更深层次的生产网络整合、技术协作与区域供应链韧性构建。

4 结论与建议

基于 2012—2024 年联合国商品贸易统计数据，构建国际稀土永磁制成品贸易网络，综合运用复杂网络分析与贸易依赖指数方法，系统剖析了网络的结构特征、演化轨迹与依赖关系动态，得出以下主要结论。

1）国际稀土永磁制成品贸易网络的整体互联性显著增强，呈现出高效且具有“小世界”的网络结构。2012—2024 年贸易关系数量与网络密度持续增长，各国间贸易联系日益紧密。同时，网络平均路径长度明显缩短，平均聚类系数始终维持在较高水平，贸易流能够以更少的中间环节在全球快速传递，整体贸易效率不断提升。

2）网络节点的影响力格局发生重构，呈现出多极化与功能分化的特征。德国依托高端制造业基础，始终占据网络的核心枢纽地位。中国的度中心度虽经历先升后降的调整，但仍稳居前列，中国作为全球主要供应国和消费市场的角色相对稳定，但中国的中介中心性排名相对靠后，表明中国在贸易流的“桥梁”与“控制”功能上并非主导。与此形成对比的是，法国、意大利、巴西等国家在 2024 年成为新的关键中介节点，泰国等新兴市场国家的直接影响力显著上升，美国的直接连接影响力则相对减弱。上述变化说明，网络权力不再高度集中于单一或少数国家，而是在生产、中转、消费等不同功能环节上实现了分散化布局。

3）贸易网络的中观结构经历了从效率导向到安全优先转变，形成了显著的阵营化格局。早期的贸易子群划分更多遵循地理邻近与全球价值链分工的效率逻辑，但在 2020 年之后，地缘政治与供应链安全成为主导力量。网络形成三大贸易子群，一个是以中国为核心，广泛整合俄罗斯、中亚、非洲及拉美等“全球南方”资源国与新兴市场的贸易子群；另一个则是以美国、德国、法国等传统发达国家为核心，强化内部协同与“友岸外包”的贸易子群；此外，以印度、东南亚国家为代表的第三子群独立存在。阵营化聚集是当前全球战略性产业贸易格局的典型缩影。

4）国家间的贸易依赖关系整体向中高强度聚合，且空间模式与性质发生关键转变。依赖关系拓扑显示，中度与高度依赖联系持续增加，而低度依赖关系在 2024 年大幅收缩。对核心依赖关系的剖析进一步揭示了两大趋势：一是区域化收缩，2024 年最高强度的依赖关系大量出现在欧洲内部国家之间，反映出在地缘不确定性下供应链的近岸化、友岸化重组倾向；二是协同深化，主要依赖关系从早期的资源－市场互补型，日益转向制造业体系内部发达国家之间的深度生产协同型。中国的最高等级依赖关系从德国转向荷兰，也体现了供应链路径为适应新格局而进行的战略调整。

基于上述结论，为有效应对国际稀土永磁贸易

网络的复杂演化，增强中国产业链供应链的韧性与战略主动性，提出以下建议。

1）实施枢纽强化与通道多元化战略，保障供应链畅通与安全。针对网络“小世界”特征蕴含的效率与风险，中国在维护现有贸易通道的同时，必须着力降低对单一路径的过度依赖。应积极规划并建设多元化的国际物流与贸易枢纽，特别是在“一带一路”沿线、RCEP 区域内筛选关键节点，通过投资建设海外仓、区域分拨中心，加强与当地港口和物流企业合作，构建辐射全球的供应链网络。这既能提升中国产品进入各区域市场的效率与稳定性，又能增强中国的连接广度与迂回能力，缓冲局部冲击。

2）推动嵌入式协同与标准引领，深度融入并塑造高端产业链。面对依赖关系向发达国家间深度协同演变的趋势，中国企业不能满足于充当产品供应商。应鼓励和支持龙头磁材企业与下游全球顶尖的整机制造商建立战略合作伙伴关系，从联合研发、共同设计入手，实现技术共生与标准共建。政府可通过搭建国际产业创新合作平台，设立专项基金，支持在关键应用领域建立跨国联合实验室或创新联盟。通过深度嵌入高端制造生态，将贸易关系升华为技术、标准与利益的融合关系，稳固并提升中国在全球价值链中的不可或缺地位。

3）深化南南合作与拓展第三极市场，构建更加平衡的贸易格局。为应对贸易网络阵营化带来的市场分割风险，需在巩固与传统发达国家市场联系的基础上，将“全球南方”与“第三极”市场提升至战略高度。针对不同区域特点实施差异化策略：对东南亚、印度等制造业快速发展的地区，推动中高端永磁产品出口与技术合作，在当地建立应用开发与服务中心；对中亚、非洲等资源富集区，可结合清洁能源项目建设，推广以稀土永磁为核心的风电等整体解决方案，带动产品出口与产能合作。通过深化与上述地区的经济联系，形成更广阔、更多元的市场空间，增强中国外贸的自主性与回旋余地。

4）聚焦核心技术突破与品牌化发展，巩固网络核心节点地位。中国在网络中“生产强、中介弱”的角色结构，根源在于产业链附加值分布。必须坚定不移地向技术高峰攀登，集中资源攻克高性能、低稀土用量乃至无稀土永磁材料等前沿技术，掌握产业发展的根本命脉。同时，大力培育具有全球影响力的终端应用品牌，以终端品牌带动核心部件需求，掌握价值链的分配主导权。通过“技术 + 品牌”双轮驱动，将中国的规模制造优势，转化为不可替代的技术优势，从而在网络中占据更主动、更核心的位置。

5）建立健全供应链风险监测与多边协商机制，积极参与全球治理。面对由非经济因素驱动的网络变局，需提升风险预警与规则塑造能力。建议由国家级产业研究机构牵头，联合重点企业，建立覆盖稀土永磁全产业链的全球动态监测预警系统，实时评估地缘政治、贸易政策、技术替代、物流瓶颈等风险。在国际层面，应更主动地参与世界贸易组织、国际标准化组织等框架下关于关键矿产、绿色供应链、产品碳足迹等规则的讨论与制定，提出契合行业发展、平衡安全与效率的中国方案。通过积极参与和引导全球产业治理，为行业的开放、稳定与可持续发展营造有利的国际制度环境。

参考文献

边璐，王晓贺，张江朋，等，2020. 稀土产品价格决定：影响因素与预测方法综述[J]. 稀土，41(4)：146-158.〔Bian Lu，Wang Xiaohe，Zhang Jiangpeng，et al.，2020. Review of rare earth price：Influencing factors and forecasting methods[J]. Chinese Rare Earths，41(4)：146-158.〕

边璐，庄小央，刘朝晖，等，2023. 产业政策调整对行业系统性风险溢出的影响：基于稀土产业 CoVaR 模型的研究[J]. 软科学，37(1)：23-30.〔Bian Lu，Zhuang Xiaoyang，Liu Zhaohui，et al.，2023. Impact of industrial policy adjustment on industry systemic risk spillover：Based on the analysis of CoVaR model of rare earth industry[J]. Soft Science，37(1)：23-30.〕

陈乔，靳诚，邓祖涛，2022. 全球稀土贸易网络结构特征及路径演变[J]. 地理与地理信息科学，38(3)：58-65.〔Chen Qiao，Jin Cheng，Deng Zutao，2022. Structural characteristics and path evolution of global rare earth trade network[J]. Geography and Geo-Information Science，38(3)：58-65.〕

丁浚峰，杜德斌，易鑫磊，等，2025. 俄罗斯对外化石能源贸易的依赖和竞争格局演化[J]. 世界地理研究，34(2)：13-24.〔Ding Junfeng，Du Debin，Yi Xinlei，et al.，2025. Evolution of dependence and competition patterns in Russia’s fossil energy trade[J]. World Regional Studies，34(2)：13-24.〕

高凤平，张璞，刘大成，等，2019. 国际稀土市场新格局与中国稀土产业战略选择[J]. 国际贸易问题(7)：63-81.〔Gao Fengping，Zhang Pu，Liu Dacheng，et al.，2019. The rare earths global market updates and the rare earths industry master plan of the United States and its allies[J]. Journal of International Trade(7)：63-81.〕

郭尧琦，郑茹，2025. 钴产业链全球贸易的国家地位与风险传播[J]. 中南大学学报(社会科学版)，31(1)：123-135.〔Guo Yaoqi，Zheng Ru，2025. The national status and risk transmission of global trade in the cobalt industry chain[J]. Journal of Central South University (Social Sciences)，31(1)：123-135.〕

蒋子龙，王军，李军，等，2025. 全球棕榈油贸易网络演化及多元驱动机制[J]. 经济地理，45(4)：97-108.〔Jiang Zilong，Wang Jun，Li Jun，et al.，2025. Evolution and diverse driving mechanisms of the global palm oil trade network[J]. Economic Geography，45(4)：97-108.〕

蒋小荣，杨永春，刘清，等，2021. 多重贸易网络的空间演化特征及其影响因素：基于货物、服务和增加值贸易的比较[J]. 地理科学，41(8)：1419-1427.〔Jiang Xiaorong，Yang Yongchun，Liu Qing，et al.，2021. Spatial evolution characteristics and influencing factors of trade multidimensional network：A comparative study based on trade in goods，services and value-added[J]. Scientia Geographica Sinica，41(8)：1419-1427.〕

李航飞，魏少彬，2024. 全球稀土贸易网络时空格局演化与中国地位变迁研究[J]. 世界地理研究，33(6)：1-13.〔Li Hangfei，Wei Shaobin，2024. A study on spatial-temporal pattern evolution of global rare earth trade network and China's status change[J]. World Regional Studies，33(6)：1-13.〕

李帅威，王文军，2025. 全球锂电池产业链贸易格局演化、趋势研判及韧性分析[J]. 中国软科学(4)：26-40.〔Li Shuaiwei，Wang Wenjun，2025. Evolution of the global lithium battery industry chain trade structure，trend assessment，and resilience analysis[J]. China Soft Science(4)：26-40.〕

廖秋敏，罗连英，2023. 稀土产品全球贸易网络格局演化及其影响因素[J]. 黄金科学技术，31(5)：823-834.〔Liao Qiumin，Luo Lianying，2023. Evolution of the global trade network pattern of rare earth products and its influencing factors[J]. Gold Science and Technology，31(5)：823-834.〕

刘亦文，刘惠，2024. 国际石油贸易网络动态演化及其驱动因素[J]. 资源科学，46(9)：1852-1866.〔Liu Yiwen，Liu Hui，2024. Dynamics and driving factors of the international oil trade network[J]. Resources Science，46(9)：1852-1866.〕

鲁景亮，2017. 稀土发光材料研发及应用进展[J]. 黄金科学技术，25(2)：32-37.〔Lu Jingliang，2017. Development and application of rare earth luminescent materials[J]. Gold Science and Technology，25(2)：32-37.〕

陆颖，史继强，刘宇，等，2019. 中国稀土材料领域研发态势分析与发展建议[J]. 世界科技研究与发展，41(1)：63-76.〔Lu Ying，Shi Jiqiang，Liu Yu，et al.，2019. Study on development situation of rare earth materials research and suggestions in China[J]. World Sci-Tech R & D，41(1)：63-76.〕

马述忠，任婉婉，吴国杰，2016. 一国农产品贸易网络特征及其对全球价值链分工的影响：基于社会网络分析视角[J]. 管理世界(3)：60-72.〔Ma Shuzhong，Ren Wanwan，Wu Guojie，2016. The characteristics of agricultural trade network and its impact on the global value chain：A social network analysis perspective[J]. Journal of Management World(3)：60-72.〕

戚兆坤，隋博文，2020. 国际比较视域下中国稀土产品出口技术结构演进及其影响因素[J]. 中国流通经济，34(9)：67-78.〔Qi Zhaokun，Sui Bowen，2020. The evolution of export technology structure of China's rare earth products and its influencing factors from the perspective of international comparison[J]. China Business and Market，34(9)：67-78.〕

国家发展改革委宏观经济研究院对外经济研究所课题组，2023. 全球产业链和货物贸易格局演变及中国应对策略[J]. 亚太经济(6)：1-10.〔Research Group of the Institute of Foreign Economic Studies of the National Development and Reform Commission，2023. Evolution trends of global industrial chain and goods trade pattern and China's countermeasures[J]. Asia-Pacific Economic Review(6)：1-10.〕

孙源辰，吴三忙，雷涯邻，等，2025. 新能源汽车产业链中含钴产品贸易网络供应风险传播研究[J]. 地球学报，46(5)：1021-1031.〔Sun Yuanchen，Wu Sanmang，Lei Yalin，et al.，2025. Supply risk propagation of cobalt-containing products trade network in the new energy vehicle industry chain[J]. Acta Geoscientica Sinica，46(5)：1021-1031.〕

汤林彬，汪鹏，陈玮，等，2024. 中国稀土贸易格局与全球竞争力提升策略研究[J]. 中国科学院院刊，39(12)：2074-2085.〔Tang Linbin，Wang Peng，Chen Wei，et al.，2024. Research on China's rare earth trade pattern and strategies for enhancing global competitiveness[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，39(12)：2074-2085.〕

王军，吴海涛，李军，等，2026. RCEP 国家谷物贸易网络演化及三元动力机制[J]. 中国农业资源与区划，47(1)：160-176.〔Wang Jun，Wu Haitao，Li Jun，et al.，2026. The evolution of grain trade networks and the triple-driving mechanism in RCEP[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning，47(1)：160-176.〕

王雪婷，熊理然，2025. 印太地区全球价值链的结构演进及其影响因素[J]. 世界地理研究，34(12)：18-33.〔Wang Xueting，Xiong Liran，2025. The structure evolution and influencing factors of the global value chain in the Indo-Pacific region[J]. World Regional Studies，34(12)：18-33.〕

王雁莉，李华姣，管建和，2024. 全球钴产业链网络动态演化内生驱动因素研究[J]. 资源与产业，26(5)：128-144.〔Wang Yanli，Li Huajiao，Guan Jianhe，2024. Endogenous drivers of dynamic evolution of global cobalt industrial chain network[J]. Resources & Industries，26(5)：128-144.〕

夏启繁，杜德斌，段德忠，等，2022. 中国稀土对外贸易格局演化及影响因素[J]. 地理学报，77(4)：976-995.〔Xia Qifan，Du Debin，Duan Dezhong，et al.，2022. Evolution and influencing factors of China's foreign trade in rare earth metals[J]. Acta Geographica Sinica，77(4)：976-995.〕

许明，杨丹辉，2019. 中国稀有矿产资源产业的国际竞争力分析[J]. 东南学术(1)：111-122.〔Xu Ming，Yang Danhui，2019. Analysis of international competitiveness of China's rare mineral

resources industry [J]. Southeast Academic Research (1): 111-122.〕

杨丹辉，高凤平，刘思艺，等，2024. 地缘政治与战略资源产业链重构：以关键稀土矿产和材料为例[J]. 中国人口·资源与环境，34(5)：19-33.〔Yang Danhui, Gao Fengping, Liu Siyi, et al., 2024. Geopolitics and critical resource industrial chain restructuring: A study of rare earth minerals and materials[J]. China Population, Resources and Environment, 34(5): 19-33.〕

杨鑫，侯珂怡，曹杰，等，2026. 基于多层网络的稀土供应风险传播研究[J]. 系统工程理论与实践，46(5)：1886-1905.〔Yang Xin, Hou Keyi, Cao Jie, et al., 2026. Supply risk propagation of rare earth industry chain based on multi-layer network [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 46(5): 1886-1905.〕

叶前林，纪韩斯，李佳倩，等，2025a. 基于国家竞争优势理论的中国稀土产业价值链重构驱动因素研究[J]. 黄金科学技术，33(2)：431-442.〔Ye Qianlin, Ji Hansi, Li Jiaqian, et al., 2025a. Research on the driving factors of China's rare earth industry value chain reconstruction based on the theory of national competitive advantage[J]. Gold Science and Technology, 33(2): 431-442.〕

叶前林，曾庆根，黎莹，等，2025b. 全球稀土贸易格局演变及进口竞争态势[J]. 稀土，46(1)：142-158.〔Ye Qianlin, Zeng Qinggen, Li Ying, et al., 2025b. Research on the evolution of global rare earth trade network pattern and import competition situation[J]. Chinese Rare Earths, 46(1): 142-158.〕

尤荻，黄永，余昊臻，等，2024. FDI 流动与碳排放耦合协调的空间关联网络：以“一带一路”国家为例[J]. 资源与产业，26(5)：47-62.〔You Di, Huang Yong, Yu Haozhen, et al., 2024. A case study on the Belt and Road nations: Coupling & coordinated spatial correlation network between FDI liquidity and carbon emission[J]. Resources & Industries, 26(5): 47-62.〕

张奇，刘伯瑜，黄振月，等，2025. 市场博弈均衡视角下全球动力电池锂金属贸易格局演化[J]. 资源科学，47(7)：1533-1545.〔Zhang Qi, Liu Boyu, Huang Zhenyue, et al., 2025. Evolution of global trade patterns of lithium metal for power batteries from a market game equilibrium perspective [J]. Resources Science, 47(7): 1533-1545.〕

张群卉，2016. 中日稀土产品贸易条件及其影响因素：基于 1993—2014 年稀土行业面板数据的实证分析[J]. 国际商务(6)：17-28.〔Zhang Qunhui, 2016. China-Japan terms of trade on rare-earth products and its decision factors: Empirical study on rare-earth products panel data from 1993 to 2014[J]. International Business (6): 17-28.〕

赵昌平，郑米雪，范厚明，2017. 金融危机后全球货物贸易复杂网络演化与中国响应战略[J]. 大连海事大学学报，43(2)：60-66.〔Zhao Changping, Zheng Mixue, Fan Houming, 2017. Complex network evolution of global trade in goods after the financial crisis and response strategy in China [J]. Journal of Dalian Maritime University, 43(2): 60-66.〕

赵怡然，高湘昀，孙晓奇，等，2022. 产业链视角下贸易依赖网络结构变动对钴价格的影响[J]. 资源科学，44(7)：1344-1357.〔Zhao Yiran, Gao Xiangyun, Sun Xiaoqi, et al., 2022. The impact of structural changes of trade dependence network on cobalt price from the perspective of industrial chain[J]. Resources Science, 44(7): 1344-1357.〕

赵芝，王登红，王成辉，等，2019. 离子吸附型稀土找矿及研究新进展[J]. 地质学报，93(6)：1454-1465.〔Zhao Zhi, Wang Denghong, Wang Chenghui, et al., 2019. Progress in prospecting and research of ion-adsorption type REE deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1454-1465.〕

郑挺国，余恒伟，叶仕奇，2025. 国际贸易溢出网络构建及中国进出口影响力探析[J]. 系统工程理论与实践，45(8)：2509-2533.〔Zheng Tingguo, Yu Hengwei, Ye Shiqi, 2025. Construction and examination of the international trade spillover network: A deep dive into China's import-export influence[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 45(8): 2509-2533.〕

周美静，王甫园，邵留国，2023. 中国境外国家〔地区〕稀土供应链韧性评估：以钕铁硼永磁体为例[J]. 资源科学，45(9)：1746-1760.〔Zhou Meijing, Wang Fuyuan, Shao Liuguo, 2023. Resilience evaluation of the rare earth supply chain in countries (regions) outside China: A case study of NdFeB permanent magnet [J]. Resources Science, 45(9): 1746-1760.〕

祝孔超，赵媛，姚亚兵，等，2022. 全球稀土进口竞争格局分析及潜在贸易联系预测[J]. 资源科学，44(1)：70-84.〔Zhu Kongchao, Zhao Yuan, Yao Yabing, et al., 2022. Global rare earth import competition pattern and prediction for potential trade links [J]. Resources Science, 44(1): 70-84.〕